

**В.А. ТКАЧЕНКО**, проф. канд. техн. наук, **И.Г. ШЕБАНОВ**, проф. канд. техн. наук, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»

## МЕСТО УСТАНОВКИ МАХОВИКА В МЕХАНИЧЕСКОМ ПРИВОДЕ ПРИ ЕГО РЕЗЕРВИРОВАНИИ

Is shown, that the statement of hand wheels on shaft of electric motors in devices with mechanical reservation with the help of differentials gives system with the best dynamic characteristics at partial refusals, then installation of the hand wheels on working to the shaft of the machine. Thus the symmetrical differentials work, then asymmetric better.

Доведено, що закріплення маховиків на валах електродвигунів у пристроях з механічним резервуванням за допомогою диференціалів дає систему з кращими динамічними показниками при часткових відмовах, ніж закріплення маховика на робочому валі машини. При цьому симетричні диференціали краще роблять, ніж несиметричні.

В работах [1,2,3] рассмотрены возможные высоконадежные приводы простого и многократного резервирования, содержащие симметричные и асимметричные дифференциалы и обеспечивающие работу устройства при частичных отказах его входных ветвей.

Постановка маховика в приводе обеспечивает снижение периодических колебаний скоростей его звеньев. Потребная для этого величина момента инерции маховика зависит от места его установки.

В качестве критерия достаточности процесса регулирования колебаний скоростей будем принимать кинетическую энергию расчетных маховиков, которые можно установить либо на входном валу рабочей машины после дифференциалов системы регулирования, либо на валах электродвигателей. При отказе одной или нескольких входных ветвей в системе изменяется характер колебаний в зависимости от места установки маховиков.

**1. Система с однократным регулированием.** Рассмотрим влияние места установки на примере системы простого или однократного регулирования с помощью двух электродвигателей ЭД1 и ЭД2 и одного дифференциала Д (рис.1). Система содержит два согласующих механизма М<sub>1</sub> и М<sub>2</sub> с передаточными отношениями  $i_{1a}$  и  $i_{2b}$

Кинематическое уравнение системы [3,4]

$$\omega_k = \omega_k^* + \omega_k^* = i_{ka}^* \omega_a + i_{kb}^* \omega_b = \frac{\omega_1}{i_{1a} i_{ak}^*} + \frac{\omega_2}{i_{2b} i_{bk}^*} = \frac{\omega_1}{i_{1k}^*} + \frac{\omega_2}{i_{2k}^*}, \quad (1)$$

где  $\omega_1$  и  $\omega_2$  – угловые скорости электродвигателей,

$\omega_k^*$  и  $\omega_k^*$  – частные угловые скорости выходного звена  $k$ ,

$$i_{1k}^* = i_{1a} i_{ak}^* \text{ и } i_{2k}^* = i_{2b} i_{bk}^* \quad (2)$$

передаточные отношения частных механизмов, образующихся при остановке одного из входных звеньев  $a$  или  $b$ .

Внутреннее передаточное отношение [3] дифференциала

$$i_{ab}^* = 1 - i_{ak}^* = \frac{1}{1 - i_{bk}^*}. \text{ Отсюда } i_{ak}^* = 1 - i_{ab}^* \text{ и } i_{bk}^* = \frac{i_{ab}^* - 1}{i_{ab}^*} \quad (3)$$

Обычно в системах регулирования применяются электродвигатели равной мощности и одинаковых величин угловых скоростей  $|\omega_1| = |\omega_2|$ . В этом случае на одноименных звеньях  $a$  и  $b$  идеального ( $\eta = 1$ ) дифференциала

$T_a \omega_a = T_b \omega_b = -T_a i_{ab}^* \omega_b$ , то есть должно выполняться равенство

$$\omega_a = -i_{ab}^* \omega_b \quad (4)$$

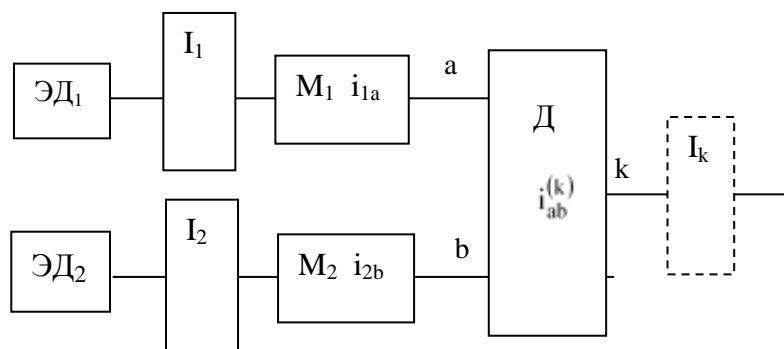


Рис.1

Равенство угловых скоростей требует применения дифференциала с  $i_{ab}^{\bullet} = -1$ . Такой дифференциал получил название симметричного, имеющего по (3) обязательно  $i_{ak}^{\bullet} = i_{bk}^{\bullet} = 2$ . Из зависимости (1) для него имеем  $\omega_k = \omega_a = \omega_b$ , то есть при безотказной работе все звенья дифференциала движутся с одинаковыми скоростями без относительных движений и потерь, что повышает надежность всего привода. В этом случае механизмы  $M_1$  и  $M_2$  должны иметь  $i_{1a} = i_{2b}$  и выполнять только роль передаточных механизмов для редукции или мультипликации угловых скоростей. Без необходимости их можно не ставить.

У несимметричных дифференциалов, когда  $i_{ab}^{\bullet} \neq -1$ , угловые скорости входных звеньев не одинаковы. Не равны и крутящие моменты  $T_a$  и  $T_b$  по зависимости  $T_b = -T_a i_{ab}^{\bullet}$ . Силовое равновесие между электродвигателями требует всегда

$$T_1 i_{1a} i_{ab}^{\bullet} i_{b2} = -T_2 \quad (5)$$

При равных потребных мощностях двигателей получим

$$i_{1a} i_{ab}^{\bullet} i_{b2} = -1 \quad (6)$$

Можно также поставить только один согласующий механизм в той или иной входной ветви в зависимости от схемы редуцирования или мультипликации. При редуцировании принимается  $i_{1a} = 1$  и должно выполняться равенство  $i_{b2} i_{ab}^{\bullet} = -1$  для выбора механизма  $M_2$ .

При применении асимметричных дифференциалов можно также получить режим повышенной надежности, когда  $\omega_k = \omega_a = \omega_b$ . В этом случае согласующие механизмы не требуются (или они имеют одинаковые передаточные отношения для выполнения передаточных функций). От двигателей будут требоваться разные мощности с коэффициентом баланса

$$\varphi = \frac{P_1}{P_2} = \frac{T_1 \omega_1}{T_2 \omega_2} = \frac{T_a \omega_a}{T_b \omega_b} = -\frac{1}{i_{ab}^{\bullet}} > 0, \quad (7)$$

что возможно только при  $i_{ab}^{\bullet} < 0$ , то есть для отдельных схем дифференциальных механизмов.

Формула Виллиса  $i_{ab}^{\bullet} = \frac{\omega_a - \omega_k}{\omega_b - \omega_k}$  при  $\omega_k = \omega_a = \omega_b$  дает неопределенность, то есть любой дифференциальный механизм любой кинематической схемы может быть использован в режиме повышенной надежности и работать в безотказном режиме как единое целое. По этой причине зависимость (1) не является кинематическим уравнением системы и не может быть использована при  $\omega_k = \omega_a = \omega_b$  (кроме случая  $i_{ab}^{\bullet} = -1$ ).

При отказе одной из входных ветвей ( $\omega_a = 0$  или  $\omega_b = 0$ ) угловая скорость выходного звена изменяется и подчиняется зависимости (1).

В случае постановки необходимого маховика с моментом инерции  $I_k$  на выходном валу (на входе в рабочую машину, показан на рис.1 пунктиром) его кинетическая энергия при безотказном режиме работы

$$E_k = \frac{I_k \omega_k^2}{2}, \text{ а при отказе, например, двигателя 1 - } E_k^{отк} = \frac{I_k \omega_k^{\bullet 2}}{2}. \text{ Отношение } \frac{E_k}{E_k^{отк}} = \left[ \frac{\omega_k}{\omega_k^{\bullet}} \right]^2$$

отражает характер и степень снижения динамических характеристик при отказе и зависит от принятого варианта расчета (равенство мощностей, угловых скоростей или совместные равенства для случая применения симметричных дифференциалов).

$$\text{Для симметричных схем } (i_{ab}^{\bullet} = -1) \quad \omega_k^{\bullet} = \frac{1}{2} \omega_k \text{ и } \frac{E_k}{E_k^{отк}} = 4.$$

Можно установить два маховика на валах электродвигателей с той же суммарной кинетической энергией в режиме безотказной работы, то есть

$$E_k = \frac{I_k \omega_k^2}{2} = \frac{I_1 \omega_1^2}{2} + \frac{I_2 \omega_2^2}{2}. \text{ Обычно при равных двигателях удобно принять } I_1 = I_2 = I_{\partial \partial}.$$

Тогда при  $\omega_1 = \omega_2 = \omega_{\partial \partial}$

$$I_k \omega_k^2 = 2I_{\partial\theta} \omega_{\partial\theta}^2 \text{ и } I_{\partial\theta} = \frac{I_k}{2} \frac{\omega_k^2}{\omega_{\partial\theta}^2} \quad (8)$$

В этом случае приведенная к выходному валу  $k$  энергия одного из маховиков (при отказе системы)

$$E_{np} = E_{\partial\theta} = \frac{I_{\partial\theta} \omega_{\partial\theta}^2}{2} = \frac{I_k \omega_k^2}{2\omega_{\partial\theta}^2} \frac{\omega_{\partial\theta}^2}{2} = \frac{I_k \omega_k^2}{4} = \frac{1}{2} E_k$$

Отношение  $\frac{E_k}{E_{np}} = 2$ , то есть снижение динамических характеристик при постановке маховиков у

двигателей в случае отказа происходит только в два раза, а не в четыре, как при постановке маховика на валу рабочей машины, независимо от схемы включения любого дифференциала. Это говорит в явную пользу и целесообразность постановки маховиков на валах электродвигателей.

Все типы дифференциальных механизмов, схемы их включения, не дающие генераторных режимов работы при суммировании двух движений, приведены в таблицах 4.1, 4.2 и 4.4 монографии [3].

**2. Системы с многократным резервированием.** Применение многократного резервирования уменьшает снижение выходной скорости в случае отказа в одной или в нескольких ветвях регулирования [3]. Уменьшается и изменение кинетической энергии системы при постановке маховиков на валах двигателей.

Рассмотрим это положение на примере системы трехкратного резервирования при четырех электродвигателях и трех дифференциалах в режиме повышенной надежности. Такая схема резервирования показана на рис.2.

Схема в силу применения симметричных дифференциалов не требует никаких согласующих механизмов. Кинематическое уравнение системы

$$\omega_k = \omega_k^{3,b1} + \omega_k^{3,a1} + \omega_k^{3,b2} + \omega_k^{3,a2}.$$

Частные угловые скорости с учетом (3)

$$\begin{aligned} \omega_k^{3,b1} &= \frac{\omega_{\partial\theta}}{i_{1k}^{3,b1}} = \frac{\omega_{\partial\theta}}{i_{a1k1}^{3,b1} i_{a3k}^{3,b1}} = \frac{\omega_{\partial\theta}}{1 - i_{ab-1}^{3,b1} - 1 - i_{ab-3}^{3,b1}} = \frac{\omega_{\partial\theta}}{4} \\ \omega_k^{3,a1} &= \frac{\omega_{\partial\theta}}{i_{2k}^{3,a1}} = \frac{\omega_{\partial\theta}}{i_{b1k1}^{3,a1} i_{a3k}^{3,a1}} = \frac{\omega_{\partial\theta}}{i_{ab-1}^{3,a1} - 1 - 1 - i_{ab-3}^{3,a1}} = \frac{\omega_{\partial\theta}}{4} \\ \omega_k^{3,b2} &= \frac{\omega_{\partial\theta}}{i_{3k}^{3,b2}} = \frac{\omega_{\partial\theta}}{i_{a2k2}^{3,b2} i_{b3k}^{3,b2}} = \frac{\omega_{\partial\theta}}{1 - i_{ab-2}^{3,b2} - i_{ab-3}^{3,b2} - 1} = \frac{\omega_{\partial\theta}}{4} \\ \omega_k^{2,a3} &= \frac{\omega_{\partial\theta}}{i_{4k}^{2,a3}} = \frac{\omega_{\partial\theta}}{i_{b2k2}^{2,a3} i_{b3k}^{2,a3}} = \frac{\omega_{\partial\theta}}{i_{ab-2}^{2,a3} - 1 - i_{ab-3}^{2,a3} - 1} = \frac{\omega_{\partial\theta}}{4} \end{aligned}$$

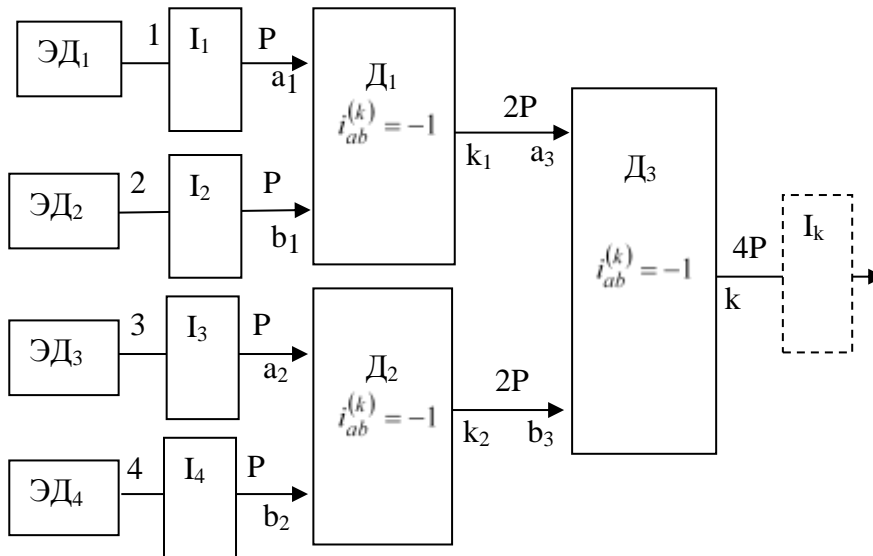


Рис.2

При отказе одной из входных ветвей угловая скорость на выходном валу равна  $\phi_k = \frac{3}{4} \omega_{\partial\partial}$ , при отказе двух ветвей  $\phi_k = \frac{1}{2} \omega_{\partial\partial}$ , а при трех отказах одновременно  $\phi_k = \frac{1}{4} \omega_{\partial\partial}$ . Соответственно кинетические энергии маховиков, установленных на выходе,  $E_k, E_k^{омк} = \left[ \frac{I_k \omega_{\partial\partial}^2}{2}, \frac{9}{16} \frac{I_k \omega_{\partial\partial}^2}{2}, \frac{1}{4} \frac{I_k \omega_{\partial\partial}^2}{2}, \frac{1}{16} \frac{I_k \omega_{\partial\partial}^2}{2} \right]$ . Отношение  $\frac{E_k}{E_k^{омк}} = \left[ \frac{16}{9}; 4; 16 \right]$ , то есть снижение динамических характеристик происходит менее резко, чем при простом однократном резервировании. Например, при отказе одного двигателя при трехкратном резервировании отношение  $\frac{E_k}{E_k^{омк}} = \frac{16}{9} = 1,78$ , а при простом резервировании  $\frac{E_k}{E_k^{омк}} = 4$ , то есть снижение в 2,25 раза меньше.

Таблица

Степень изменения кинетической энергии маховиков при резервировании системы симметричными дифференциалами

	$\frac{E_k}{E^{омк}}$ для маховика на выходном валу при отказах			$\frac{E_k}{E_{np}}$ для маховиков на входных валах и отказах		
	одном	двух	трех	одном	двух	трех
Однократное резервирование	4	–	–	2	–	–
Двукратное резервирование	2,25	9	–	1,5	3	–
Трехкратное резервирование	1,78	4	16	1,33	2	4

При установке маховиков на валах двигателя и  $I = I_1 = I_2 = I_3 = I_4$  их общая кинетическая энергия  $E_k = \frac{I_k \omega_k^2}{2} = 4 \frac{I \omega_{\partial\partial}^2}{2}$  и, следовательно,  $I = \frac{I_k}{4}$ . При выходе одной из ветвей приведенная к выходному валу кинетическая энергия трех маховиков  $E_{np} = 3 \frac{I \omega_{\partial\partial}^2}{2} = \frac{3}{4} \frac{I_k \omega_{\partial\partial}^2}{2}$  и  $\frac{E_k}{E_{np}} = \frac{4}{3} = 1,33$ , то есть меньшее снижение, чем при установке маховика на выходном валу (рабочем валу машины). Проведенные расчеты для трех случаев резервирования сведены в таблицу.

Аналогично проводится расчет массовых масс при применении асимметричных дифференциалов. Требование обеспечить равенство мощностей двигателей и постановки согласующих механизмов или требование обеспечения равенства угловых скоростей на валах асимметричных дифференциалов дает разные расчеты маховых масс и разные степени изменения динамических свойств.

#### Общие выводы:

- Постановка маховиков на валах электродвигателей более благоприятна для динамического поведения системы в режимах частичных отказов.
- Повышение степени резервирования положительно сказывается на работе системы при частичных отказах.
- Наиболее эффективно применение симметричных дифференциалов. Применение асимметричных дифференциалов при многократном резервировании дает большее изменение кинетической энергии маховиков и динамических характеристик системы даже при установке их на входных ветвях.

**Список литературы:** 1. Ткаченко В.А. Резервирование механических приводов. Сб. Проблемы качества и долговечности передач и редукторов. Труды международной научно-технической конференции, Харьков, 1997, с.116-120. 2. Ткаченко В.А. О многократном резервировании механических приводов. Вестник Харьковского государственного политехнического университета. Вып.109, Харьков, 2000, с.49-55. 3. Ткаченко В.А. Планетарные механизмы (оптимальное проектирование), Харьков, НАУ «ХАИ», 2003, 446 с. 4. Ткаченко В.А., Шебанов И.Г. Общий метод кинематического исследования дифференциальных механизмов, Вестник НТУ ХПИ, №30, Харьков, 2004, с.94-107.

